

# 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响

王 丽<sup>1,2</sup>, 王 力<sup>1,2\*</sup>, 王全九<sup>2</sup>

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**土壤前期含水量是影响土壤入渗、产流以及溶质迁移、淋失的重要因素之一。通过人工模拟降雨实验,对5%、9%、13%、17%和20%这5个不同前期含水量水平下的黄土高原沟壑区黑垆土坡耕地土壤侵蚀及氮磷流失情况进行了研究。结果显示:在同一雨强和坡度条件下,随着土壤含水量的增加,坡面达到稳定入渗率的时间缩短,开始均匀产流时间也减小;在5%~17%前期含水量的范围内,径流量、泥沙量随前期含水量增加而增加,17%~20%时径流量和产沙量为递减的变化趋势;产沙量与径流量呈显著的线性关系,相关系数为0.889。前期含水量为17%时,径流中水溶性磷、硝态氮、铵态氮浓度最大,总流失量最大,3种养分在湿润层内发生积累的深度随含水量增加而减小,前期含水量17%是影响径流中养分浓度变化的一个临界值;在前期含水量范围为5%~9%时,养分流失量变化不大,且流失量较小;硝态氮平均流失总量最大,分别是铵态氮和水溶性磷的1.32和2.46倍。该项研究结果可为当地农业生产、减少水分损失、提高水分和养分利用率提供有效的指导。

**关键词:**前期含水量;入渗;产流过程;养分浓度;流失强度

中图分类号:P333 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)11-2171-08 doi:10.11654/jaes.2014.11.015

## Effect of Antecedent Soil Moisture on Runoff and Sediment and Nitrogen and Phosphorus Losses from Slope Cropland

WANG Li<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1,2\*</sup>, WANG Quan-jiu<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of Loess Plateau Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Antecedent soil moisture is one of the important factors affecting soil infiltration, runoff and solute migration. In this research, soil erosion and nutrient losses of slope cropland were studied under five different antecedent soil moisture levers of 5%, 9%, 13%, 17% and 20% with artificial rainfall method in Dark Loessial soils in gully region of the Loess Plateau. Under the same rainfall intensity and slope, the time for slope soil to reach stable infiltration and to yield stable runoff decreased with the increasing antecedent soil moisture. The amounts of runoff and sediment increased with increasing antecedent soil moisture between 5% and 17%, but reduced between 17% and 20%. There was a significant linear relationship between the amounts of sediment and runoff, with coefficient of 0.889. Concentrations and total losses of soluble phosphorus, nitrate and ammonium were the greatest at 17% of the antecedent soil moisture. Antecedent soil moisture reduced the soil depth of phosphorus and nitrogen accumulation in moist layer. There is little amount of nutrient loss at antecedent soil moisture between 5% and 9%. These results indicate that 17% of antecedent soil moisture would be a critical value for nutrient runoff losses.

**Keywords:** antecedent soil moisture; soil infiltration; runoff process; nutrient concentrations; loss strength

水土流失导致土壤中氮、磷等养分大量损失,土壤肥力下降,并且造成水环境农业面源污染,养分流失不仅是一个农业问题,也是生态环境问题,已受到世界各国的广泛关注。降雨条件下,坡地水土和养分

大量流失且受到诸多因素的影响,其中,土壤前期含水量显著影响土壤水分入渗、土壤物理结构、营养元素存在形态及流失迁移过程。已有研究<sup>[1-4]</sup>证实在降雨入渗条件下,前期土壤含水量的差异导致土壤颗粒间结合力不同,土壤团聚体的稳定性也不同,进而影响土壤剪切强度;同时,雨滴对表土的打击夯实使土壤的物理结构进一步发生不同程度变化,土壤物理性质与前期含水量之间的关系更为复杂。土壤前期含水量影响降雨-入渗-径流过程,因此当坡耕地农作物收获

收稿日期:2014-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51239009)

作者简介:王 丽(1990—),女,甘肃张掖人,硕士研究生,主要从事黄土坡地养分流失研究。E-mail:626729317@qq.com

\*通信作者:王 力 E-mail:wangli5208@nwsuaf.edu.cn

地表裸露时,土壤前期含水量是影响坡耕地产流产沙及氮磷流失的重要因素之一。McDowell 等<sup>[5]</sup>的研究结果表明,前期含水量的波动极大地影响了土壤侵蚀和磷素流失的潜力。

黄土高原沟壑区地处半干旱地区,降水集中且多暴雨,极易产生水土养分流失。Castillo 等<sup>[6]</sup>研究认为前期土壤含水量是半干旱环境下径流产生的重要控制因素;王全九等<sup>[7]</sup>认为其影响土壤入渗能力,因而也影响着土壤溶质随径流迁移的全过程;王辉等<sup>[8]</sup>通过研究不同前期含水量氮磷流失的影响发现,淋失是土壤硝态氮流失的主要途径,在前期含水量高于20%时,会产生硝态氮大量径流流失;孔刚等<sup>[9]</sup>通过研究前期含水量对土壤化学物质流失的影响得出,磷浓度的变化范围主要在5 cm以内,随着含水量的增加有效磷向土壤中迁移的总量增加。本研究旨在对大雨强和不同前期含水量条件下长武塬坡耕地土壤养分流失过程进行室内模拟,以掌握土壤初始含水量对土壤水分入渗和养分迁移的作用机理,为控制黄土地区水土流失,指导农田灌溉、退耕还林,增加植被覆盖,改善生态环境等提供前提条件。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

降雨实验于2013年7月到9月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落终速的98%以上,降雨特性接近于天然降雨<sup>[10]</sup>。人工模拟降雨所用土壤为陕西省长武县王东沟小流域耕地表层0~20 cm的耕层土,为黑垆土,原始硝态氮含量 $10.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,铵态氮含量 $0.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量 $5.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试土壤风干后过5 mm筛,去除石块、植物根系等杂质备用。土槽坡度统一为 $15^\circ$ ,土壤装槽容重为 $1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。实验土槽规格为:长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=2.0 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$ 。在土槽的径流出口处安装“V”形钢槽收集径流,其底部均匀打有小孔,模拟自然透水坡面。土壤装至50 cm处与出口齐平,另外三边有5 cm安全加高防止雨滴击溅使坡面物质流失。

### 1.2 试验方法

土壤制备与装槽:将风干去杂后的土壤混合均匀,按照设计含水量标准进行不同程度的风干晾晒或补水,使全土槽土壤含水量达到预设水平,根据预设容重分层装槽,共装5层,每层装土厚度为10 cm,用

该层体积乘以预设容重计算每层所需土的质量,夯实并抓毛表面以防止土层之间分离。顶层10 cm土壤称重后再次晾晒,使含水量低于设计标准,产生水量差供配肥用。

顶层肥土配置:根据长武当地农民施肥习惯,设计施肥标准 $\text{P } 110 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K } 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{N } 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,用预设含水量水平与顶层干土实测含水量的差值乘以顶层土壤质量,计算出配肥所需水量,按照配肥标准将所需磷酸二氢钙、氯化钾和尿素的用量溶于计算所得水量,喷洒于顶层所需土壤并混合均匀,用塑料布覆盖静置24 h后装槽。继续用塑料布将土槽覆盖以防土壤蒸发使含水量发生变化,静置24 h后进行降雨实验。

降雨过程设定:降雨强度(雨强)定为 $1.7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,降雨前多次率定雨强,当降雨大小和均匀度均达到要求时开始降雨试验,降雨历时60 min。根据已有学者研究<sup>[11-12]</sup>并结合长武塬的坡地含水量实际情况,确定前期含水量研究范围为5%~20%,并在该范围内,将含水量等分为5个水平:5%、9%、13%、17%、20%,均设3个重复。当径流槽地表开始均匀产流,记录初始产流时间,在均匀产流前10 min内每间隔1 min收集径流水样,之后10~30 min每隔5 min收集径流水样,30~60 min每隔10 min收集径流水样直到降雨结束。其余径流全部收集在径流大桶内。

取样过程:径流样静置后取上清液冷藏,测定水溶性磷、硝态氮、铵态氮。降雨结束3 h后,对每个径流槽挖剖面取样,挖好剖面后观察湿润峰位置并用钢尺测量出入渗深度。在0~4 cm深度内每2 cm取一次样,每次取样横向纵向分别平行取3个重复,以后每1 cm取样1次,3次重复,直至取至湿润峰处。径流槽中部每5 cm取一次样,3次重复,取至湿润峰处,测定水分变化。采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷; $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 浸提法流动元素分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮<sup>[9]</sup>。

平均径流深度和土壤平均入渗率利用以下公式计算<sup>[9]</sup>:

$$H=10R/(tS)$$

$$i_a=(Pt\cos\alpha-10R/S)/t$$

式中: $H$ 为平均径流深度(mm); $i_a$ 为坡面平均入渗率( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ); $R$ 为在 $t$ 时间内产生的径流量( $\text{mL}$ ); $S$ 为坡面实际承雨面积( $\text{cm}^2$ ); $P$ 为降雨强度( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ); $\alpha$ 为地表坡度( $^\circ$ ); $t$ 为降雨时间(min)。

控制雨强、坡度、下垫面等条件一致,在只改变前

期含水量的情况下,采用以下公式来计算三种溶质流失强度:

$$m(t)=c(t)\times r(t)$$

式中: $m(t)$ 为 $t$ 时刻径流溶质流失率, $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $c(t)$ 为 $t$ 时刻坡面出口处的径流浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $r(t)$ 为 $t$ 时刻径流率, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同含水量条件下平均入渗率及径流深度变化

前期土壤含水量对坡地降雨-入渗-产流过程有着重要的影响,裸地土壤产流时刻随前期土壤含水量的变化最为明显<sup>[13]</sup>。在同一雨强和坡度条件下,随着土壤含水量的增加,坡面达到稳定入渗率的时间变短,开始均匀产流时间也减小。但由于黑垆土成土母质为风成黄土,土体深厚,结构疏松,质地均一,其不同前期含水量条件下坡面均匀产流时间差异不显著。

土壤平均入渗率和平均径流深度计算结果如图1所示:土壤入渗能力在产流开始0~5 min内迅速减小,随后波动减弱,30 min后,5个含水量水平坡面的入渗能力达到相对稳定值。总体入渗能力大小变化为:含水量5% > 含水量9%;含水量13%、17%、20%三个水平入渗能力变化很小且当表层土体达到饱和时,降雨全部转化为径流,稳定入渗率几乎为0。不同前期含水量条件下坡面径流深度与平均入渗率呈相反的变化趋势,前期含水量为5%时稳定径流深度为1.2 mm;含水量9%稳定径流深度为1.4 mm;前期含水量为13%、17%、20%的三个坡面的稳定径流深度没有明显差异,相互交错在1.7 mm附近。这说明,随着土壤前期含水量的增加,土壤孔隙更多的被水充满,在雨滴打击和夯实作用下,土壤颗粒亦随之迁

移、堵塞土壤孔隙,使土壤形成致密层,随着降雨历时延长,致密层逐渐变厚,土壤入渗能力随之减弱,而坡面径流深度逐渐增加。因为含水量为13%、17%、20%时平均入渗率几乎为0,所以这三个坡面平均径流深度的差异不大。由此可知,前期含水量较小时(5%、9%)对入渗率影响较大,而>13%时,降雨几乎转换为径流,导致此时的径流深度随之加大,分析可知,前期含水量与平均稳定入渗率呈显著负相关关系,相关系数为-0.883( $P<0.05$ ),而平均稳定径流深与平均稳定入渗率呈显著线性负相关关系,相关系数为-0.968( $P<0.01$ ),主要是由于当入渗率稳定后,降雨扣除入渗即为径流。

### 2.2 不同含水量条件下产流量与产沙量的变化

不同土壤前期含水量条件下坡面径流量和泥沙流失量的变化如图2所示。含水量为13%时产流量最大,含水量为17%时产沙量最大,含水量在5%~17%范围内降雨产生的泥沙量随前期含水量增加而增加。这种规律与已有研究结果一致<sup>[14-16]</sup>。含水量为17%~20%时,径流量和产沙量为递减的变化趋势,原因主要是当前期含水量大于17%时,土壤产生结皮,减缓了降雨入渗、增大了地表径流,从而起到抑制产沙的作用<sup>[17]</sup>。分析可知,径流量、产沙量随前期含水量的变化趋势均可用多项式拟合,决定系数 $R^2$ 都在0.85以上,能够较好地反应产流量和产沙量随前期含水量的变化,且产沙量与径流量呈显著的线性关系,相关系数为0.889( $P<0.05$ ),呈现“水大沙多”特性。因此,前期含水量的不同,使土壤初始物理性状存在较大差异,再加上雨滴的打击夯实作用以及径流的冲刷作用,黑垆土的产流产沙并不是单一的随前期含水量递增或递减变化,其存在一个阈值,范围大致在13%~17%,可为治理坡耕地水土流失提供一定科学依据。

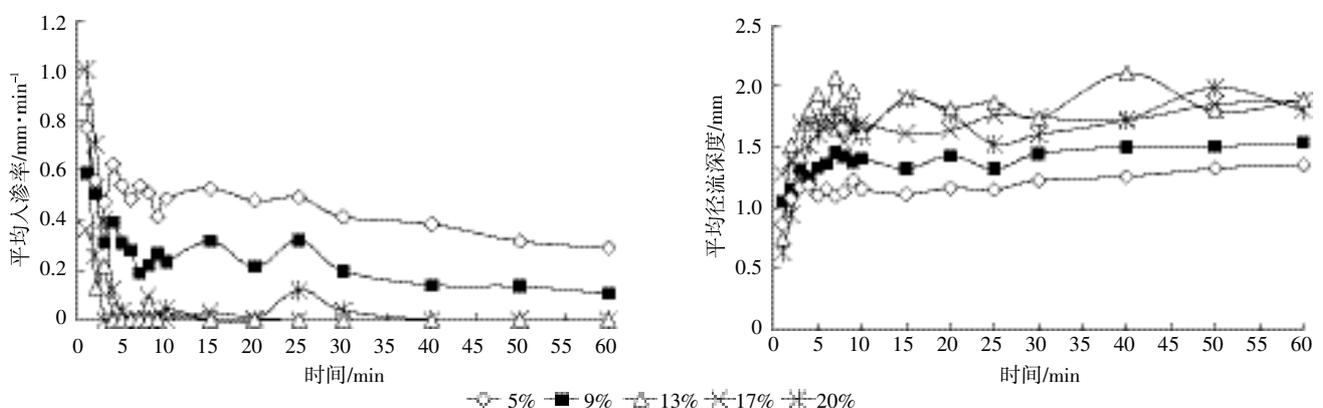


图1 平均入渗率和径流深度随产流时间的变化

Figure 1 Changes of average infiltration rate and runoff depth over runoff time under different antecedent soil moisture

### 2.3 径流中氮磷浓度随产流历时的变化过程

径流中养分浓度随产流时间的变化如图3,水溶性磷、硝态氮、铵态氮三种养分在径流中的浓度均表现为随产流时间迅速减小并趋于相对稳定趋势。不同前期含水量条件下径流中养分浓度在0~10 min内明显降低并存在较大的波动,随后相对稳定。经分析,径流中硝态氮的平均浓度在产流开始前10 min与稳定阶段随前期含水量的变化均可用二次多项式拟合,决定系数 $R^2$ 分别为0.76和0.63。稳定阶段径流铵态氮平均浓度随前期含水量的变化也符合二次多项式的变化趋势, $R^2$ 为0.84。且前10 min水溶性磷、硝态氮、铵态氮的平均值均大于10 min后的平均稳定值,前者分别是后者的1.79、1.11和1.74倍。由于磷素与土壤之间能发生剧烈反应,土壤吸持和固定磷素的容量很大,磷素很难在土壤中移动,地表径流是磷素流失的最重要途径。在其他条件一致时,土壤前期含水量的变化对磷扩散系数有较大影响,磷扩散系数随含水量增加而增大,而扩散系数增大的幅度也因含水量不同而异,一般是水分含量低时增加慢,水分含量高时增加快<sup>[18]</sup>。因此,土壤前期含水量决定了土壤中磷的存在形态,在同一雨强和坡度条件下,前期含水量越高,土壤中溶解态形式存在的磷所占的比例越大,土壤中磷以溶解态形式释放到径流中的几率也越大,水溶性磷浓度在含水量5%~17%范围内呈增加趋势。

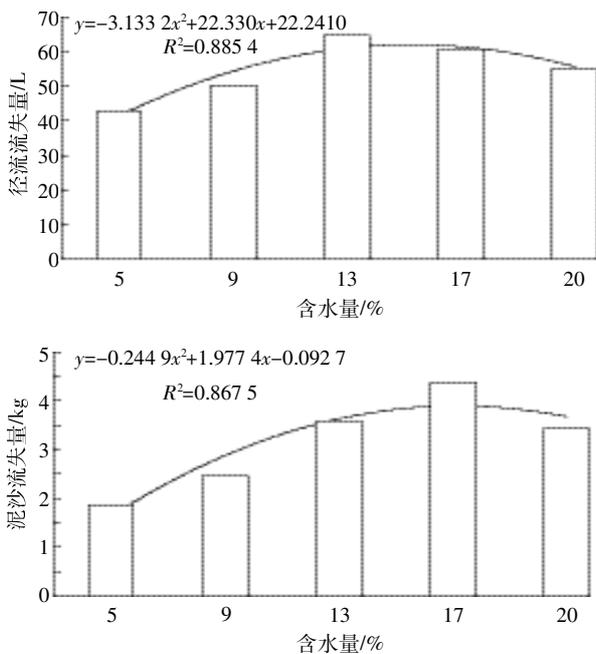


图2 不同前期含水量条件下的产流产沙量

Figure 2 Amounts of runoff and sediment under different antecedent soil moisture

已有研究证实<sup>[19-21]</sup>,土壤前期含水量影响降雨入渗-产流-产沙,土壤物理结构也因此发生改变,而且对于土壤溶质而言,土壤表层一定深度内的溶质可随地表径流迁移,而此深度以下的溶质不随地表径流迁移;且随着前期含水量的增加,土壤易板结,参与径流水分运移的土壤减少,所以当含水量在17%~20%范围时,磷浓度呈减小趋势。含水量为17%时,径流中水溶性磷浓度最大。径流中硝态氮、铵态氮浓度随前期含水量不同的变化为含水量5%<9%<13%<20%<17%,其中:硝态氮浓度稳定时,随前期含水量的变化幅度为9.4%~35.9%,含水量17%时硝态氮随径流流失稳定时的浓度是5%条件下的1.36倍,铵态氮平均浓度随前

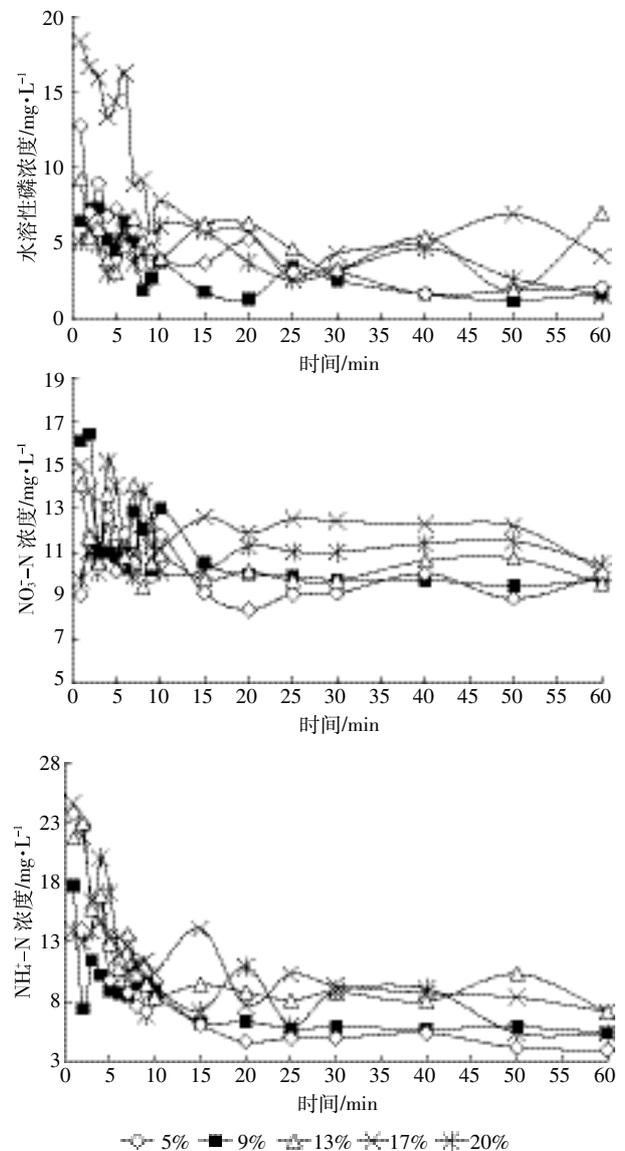


图3 径流中氮磷浓度变化

Figure 3 Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in runoff under different antecedent soil moisture

期含水量变化幅度较大,17%时其平均浓度为5%的2.36倍,该变化趋势与产流-产沙量变化趋势一致,为近似抛物线的趋势,且当前期含水量为17%时,产沙量达到最大,所以由于径流挟沙量多,其硝态氮、铵态氮浓度也达到最大。因此,可认为含水量大致在17%是影响径流中养分浓度变化的一个转折点。

#### 2.4 土壤湿润峰深度内氮磷垂直变化

土壤前期含水量直接影响土壤入渗能力以及入渗深度,从而导致土壤中养分淋溶迁移状况不同。不同前期含水量条件下土壤养分在湿润峰深度的垂直分布如图4。有效磷含量在湿润层内随深度变化并不明显,这是因为磷容易被土壤固定,很少向土壤深层迁移,其淋溶流失强度较氮、钾等弱<sup>[22-23]</sup>,因此有效磷向土壤深层迁移很少,湿润峰深度内有效磷含量垂直分布变化不大。在6 cm深度,含水量为5%、13%、17%的三个坡面有效磷出现积累现象,说明这三种含水量条件下有效磷随水分向下作用深度为6 cm;含水量为9%的坡面由于其入渗深度最大,有效磷向下淋失至7 cm处达到较高浓度,在7 cm以下深度内含量变化较稳定。前期含水量为20%时,土壤稳定入渗率几乎为0,有效磷随水分入渗而淋失的深度最小,在5 cm处发生积累,5 cm以下释放出来的有效磷随土壤入渗水分的递减而逐渐减少。

硝态氮作为土壤非反应性离子,与土壤颗粒之间的相互作用力较弱,在降雨径流的溶解和浸提作用下极易随之流失并随水分入渗而发生迁移<sup>[24]</sup>。土壤前期含水量对土壤入渗能力的直接影响,导致了硝态氮在土壤湿润峰深度淋溶状况不同。在表层0~3 cm厚度,硝态氮主要随径流流失,含量有减小的趋势,3 cm以

下深度硝态氮随水分运动向下淋溶,含量随深度逐渐增加。随着前期含水量的增加,硝态氮向下淋溶的深度以及发生积累的深度减小,含水量为5%和9%时,硝态氮在8~9 cm深度层发生积累,含量达到最大值,而含水量为13%、17%和20%时,硝态氮含量最大值出现在5~6 cm深度层。

铵态氮含量在0~5 cm深度内呈减小趋势,以下深度内,含量大小存在波动,但总体变化范围相对稳定。这种现象的原因:一方面是土壤中的铵态氮可被土壤胶体吸附,呈交换性铵态氮肥,能直接被植物吸收利用<sup>[25]</sup>;另一方面,铵态氮肥在常温下易损耗。而本研究是在裸露坡面上进行,没有植被的利用,因此铵态氮在0~5 cm深度除了随水分入渗向下迁移以外,主要是以蒸发方式损耗,5 cm以下铵态氮向下淋溶,浓度逐渐增加。前期含水量为5%和9%的坡面铵态氮在6 cm深度层发生积累,含量达到最大,前期含水量为13%和17%的坡面铵态氮发生积累的深度层在7 cm处,含水量为20%的坡面铵态氮含量一直保持很低,没有明显的发生积累的深度层。

综合不同前期含水量条件下3种养分在湿润层内的积累深度变化趋势发现,有效磷、硝态氮、铵态氮的积累深度随前期含水量变化均可用二次多项式拟合, $R^2$ 分别为0.77、0.85、0.80。

#### 2.5 不同前期含水量条件下氮磷流失强度变化

径流溶质随产流时间流失量的多少主要由两个因素决定:某一时刻溶质浓度和其对应的径流量。土壤前期含水量对这两个因素都有很大的影响。图5显示了水溶性磷、硝态氮、铵态氮随降雨历时流失强度的变化。三种溶质流失量随前期含水量变化为5%<

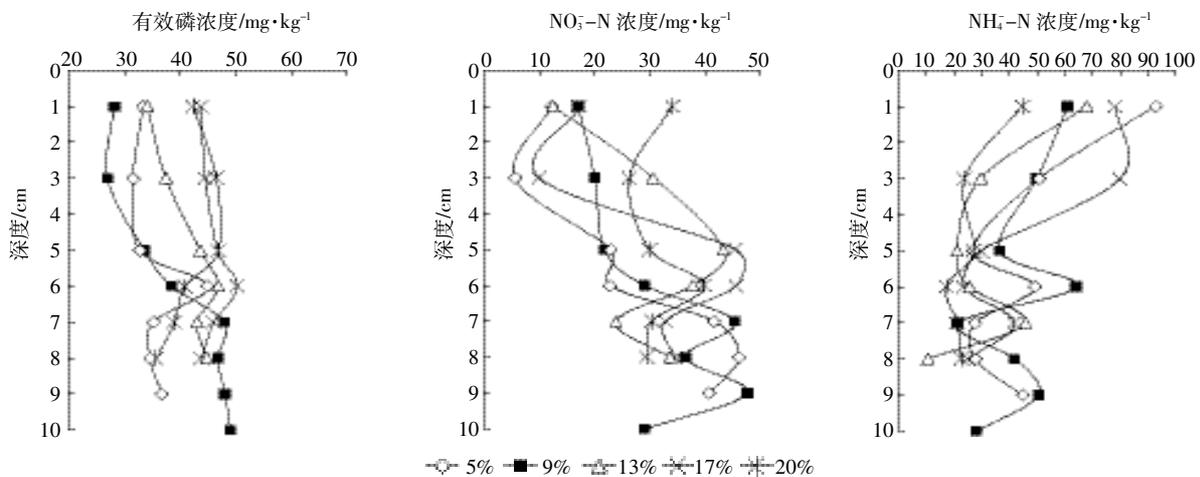


图4 氮磷在湿润层内的垂直分布

Figure 4 Vertical distributions of nitrogen and phosphorus in soil wet layer under different antecedent soil moisture

9%<13%<20%<17%,其中,硝态氮稳定流失强度随前期含水量呈二次函数变化趋势, $R^2$ 达到0.98。前期含水量为17%时,水溶性磷、硝态氮和铵态氮平均流失强度最大,分别为含水量5%条件下的2.05、1.84和2.53倍,与三种养分随产流时间流失浓度的变化趋势一致。孔刚等<sup>[9]</sup>的研究指出,当初始含水量在5%~20%变化时,土壤养分的流失量随初始含水量的增加而增加。而本研究发现,当含水量为17%~20%之间时,养分流失量呈减小趋势。由于供试土壤类型以及坡面处理方式不同,两个研究结论存在此差异。养分流失强度受两个方面的影响,一是径流量,二是径流中养分浓度。3种养分流失强度变化趋势在0~10 min内由于径流中养分浓度呈减小的变化趋势,而径流强度则处于增加状态,养分流失强度变化存在较大波动。随后产流时间内,产流量和径流中养分浓度变化逐渐趋于稳定,相应地养分流失率也随产流历时的增加而趋于稳定。

不同前期含水量条件下,3种养分流失总量随前期含水量的变化如图6所示。在含水量5%~9%之间,3种养分流失量基本保持不变;随着含水量的增加,在9%~17%范围内,流失量随前期含水量的增加呈明显增加趋势,其中,含水量17%时水溶性磷总流失量为9%条件下的3.38倍,硝态氮和铵态氮的增加幅度分别为40.8%和84.2%;而当含水量为17%~20%时,养分流失量随含水量增加而减小,减小幅度分别为水溶性磷59.6%、硝态氮6.7%、铵态氮24.2%。由此可知,前期含水量17%可能是影响养分流失量的临界值,而在前期含水量5%~9%之间,养分流失量最低。5种含水量下养分流失总量表现为硝态氮>铵态氮>水溶性磷,其中硝态氮平均流失总量为593.63 mg,分别是铵态氮和水溶性磷的1.32和2.46倍。

### 3 讨论

水分运动和分布过程制约并决定着土壤溶质的迁移过程,坡面-入渗-径流过程就是土壤溶质溶解、随入渗水和径流水迁移的过程<sup>[27]</sup>,土壤前期含水量则是影响坡面-入渗-径流过程的重要因子之一。本文基于不同前期含水量的研究发现,坡面开始均匀产流的时间及产流产沙量随前期含水量的变化趋势与已有研究结果类似。Philip<sup>[27]</sup>研究指出:在积水入渗条件下,土壤初始含水量越高,初始入渗率越低,但对稳定入渗率的影响可以忽略。在本研究中,含水量5%的入渗率大于含水量9%,前期含水量为13%~20%时土壤稳

定入渗率几乎为0。这一趋势与该研究结果一致。

在不同前期含水量条件下,水溶性磷随含水量呈现的流失规律与徐明岗等<sup>[18]</sup>的研究结果相似,其扩散系数随含水量增加而增大,土壤中溶解态形式存在的磷所占的比例也随之增加。铵态氮具有易挥发的特性,本实验采用裸露坡面进行研究,可排除植物对其吸收利用的影响,因此得出在0~5 cm深度土层内,铵态氮含量随深度增加而减小,除了随水分入渗向下迁移以外,主要是以蒸发方式损耗。硝态氮在表层0~3 cm厚度随径流流失,3 cm以下深度硝态氮随水分运动向下淋溶,含量随深度逐渐增加。而赵野等<sup>[24]</sup>对棕壤土的研究结果显示当前期土壤含水量小于20%时,大部分硝态氮随入渗水已迁移到深层土壤,导致迁移

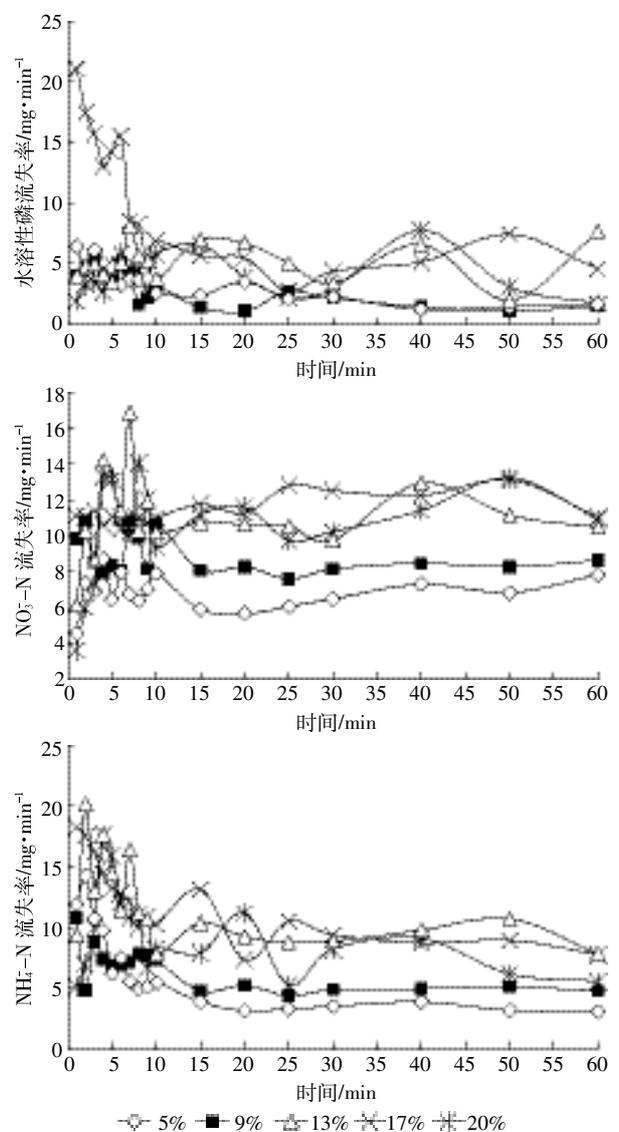


图5 不同前期含水量条件下养分流失强度  
Figure 5 Intensity of nutrient losses under different antecedent soil moisture

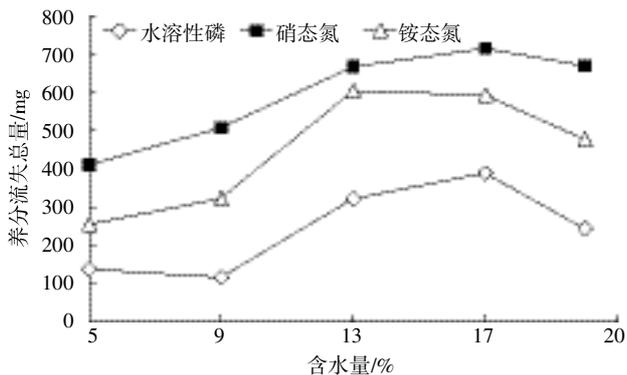


图6 养分流失总量随前期含水量的变化

Figure 6 Changes of total nutrient loss under different antecedent soil moisture

到径流中的硝态氮已很少。这与本研究结果存在差异,其主要原因有两点:一是两者所用土壤不同,棕壤土有明显的淋溶作用,且棕壤土入渗能力较强,水分向下作用深度最大达到16 cm处,硝态氮随水分运动向下淋失严重,淋失深度较深,而本实验所用黑垆土,湿润峰深度最深达到10 cm,混合作用深度小;二是两者所设计的实验土槽坡度不同,与前者相比,本实验为描述长武塬坡地实际情况采用统一坡度15°,坡度较大,产流产沙量较大,且在含水量设计方面,赵野的研究含水量梯度变化大,最大前期含水量设计为25%,而本研究设计为20%,含水量水平偏低。因此,黑垆土硝态氮流失和积累的深度与其研究结果相比,相对较小,表层3 cm厚度内硝态氮主要随径流泥沙流失。

本研究得出,前期含水量17%为影响产流产沙量和养分流失量的临界值,这一结果与王辉等<sup>[28]</sup>的研究结果不同,王辉等指出壤土土壤流失量随前期含水量呈抛物线变化,前期含水量为25%时土壤流失量最大。壤土地多为粉砂质壤土或粉砂质粘壤土,疏松多孔隙,而本研究所用土壤为黑垆土,因此实验所得结果不同。而且本研究前期含水量范围较小,最终实验结果显示土壤流失量在前期含水量5%~20%范围内呈抛物线变化,含水量为13%时产流量最大;含水量为17%时产沙量最大。两个结论综合可知,在前期含水量5%~20%范围内,产流产沙量随前期含水量不是单一的增加趋势,而是在含水量13%~20%之间存在峰值。

#### 4 结论

(1)在同一雨强和坡度条件下,随着土壤含水量的增加,坡面达到稳定入渗率的时间变短,开始均匀产流时间也减小。

(2)含水量在5%~17%范围内径流量、泥沙量随前期含水量增加而增加,17%~20%时,径流量和产沙量为递减的变化趋势。产流量和产沙量随前期含水量的变化过程可以用多项式拟合,决定系数 $R^2$ 都在0.85以上,能够较好地反应产流量和产沙量随前期含水量的变化过程,且产沙量与径流量呈显著的线性关系,相关系数为0.889( $P < 0.05$ ),呈现“水大沙多”特性。

(3)不同前期含水量条件下径流中养分浓度在0~10 min内明显降低并存在较大的波动。前期含水量为17%时,径流中水溶性磷、硝态氮、铵态氮浓度最大,总流失量也最大,前期含水量17%为影响径流养分流失的临界值。湿润层内养分发生积累的深度随含水量增加而减小。3种养分流失总量表现为硝态氮>铵态氮>水溶性磷,其中硝态氮平均流失总量分别是铵态氮和水溶性磷的1.32和2.46倍。

本研究结果显示,在含水量范围为5%~9%时,养分流失量变化不大,且流失量较小,当含水量逐渐增加到17%时,水沙流失量和养分流失量随之增加并在17%时达到最大值。在黄土高原沟壑区坡耕地地表裸露时,为了让养分流失降到最低,适宜的前期含水量应为9%左右。该研究结果能够对当地农作物收获后耕地的合理灌溉,减少水土及养分流失提供有效指导。

#### 参考文献:

- [1] Truman C C, Bradford J M. Effect of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall[J]. *Soil Science*, 1990, 150:787-798.
  - [2] Truman C C, Bradford J M, Ferris J E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregates breakdown[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54(5):1385-1392.
  - [3] Rudolph A, Helming K, Diestel H. Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes[J]. *Soil Technology*, 1997, 10:69-81.
  - [4] Poesen J, Luna E D, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content [J]. *Catena*, 1999, 36(4):315-329.
  - [5] McDowell R W, Sharpley A N. The effect of antecedent moisture conditions on sediment and phosphorus loss during over-land flow: Mahantango Creek catchment, Pennsylvania, USA[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16:3037-3050.
  - [6] Castillo V M, Gomez-Plaza A, Martinez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A simulation approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284:114-130.
  - [7] 王全九, 张江辉, 丁新利, 等. 黄土区土壤溶质径流迁移过程影响因素浅析[J]. *西北水资源与水工程*, 1999, 10(1):9-13.
- WANG Quan-jiu, ZHANG Jiang-hui, DING Xin-li, et al. Analysis of influencing factors of soil solute transfer with surface runoff[J]. *Water*

- Resources & Water Engineering*, 1999, 10(1):9-13.
- [8] 王 辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8):1571-1578.  
WANG Hui, WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an. Effect of antecedent soil moisture on nitrate-N and phosphorus loss from loess slope-land and determination of optimal moisture values[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8):1571-1578.
- [9] 孔 刚, 王全九, 樊 军, 等. 前期含水量对坡面降雨产流和土壤化学物质流失影响研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(6):1395-1399.  
KONG Gang, WANG Quan-jiu, FAN Jun, et al. Effects of initial water content on hillslope rainfall in infiltration and soil nutrient loss[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6):1395-1399.
- [10] 周佩华, 张学栋, 唐克利. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4):27-30.  
ZHOU Pei-hua, ZHANG Xue-dong, TANG Ke-li. Rainfall installation of simulated soil erosion experiment hall of the state key laboratory of soil erosion and dry land farming on Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(4):27-30.
- [11] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 等. 水蚀条件下土壤初始含水量对黄土坡地溶质迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4):1-6, 20.  
ZHANG Ya-li, LI Huai-en, ZHANG Xing-chang, et al. Effect of soil antecedent water content on soil solutes release and transport on Loess Slope under water erosion condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4):1-6, 20.
- [12] 秦 川, 何丙辉, 王 亮, 等. 紫色土区土壤初始含水量对坡面径流溶质流失的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1):19-24.  
QIN Chuan, HE Bing-hui, WANG Liang, et al. Effect of the soil antecedent water content on soil solutes loss on slope of purple soil region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1):19-24.
- [13] 袁建平, 蒋定生, 甘 淑. 影响坡地降雨产流历时的因子分析[J]. 山地学报, 1999, 17(3):259-264.  
YUAN Jian-ping, JIANG Ding-sheng, GAN Shu. Factors affecting rainfall-runoff duration on sloping land[J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(3):259-264.
- [14] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 等. 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究[J]. 中国水土保持, 1987, 9:27-29, 66.  
JIA Zhi-jun, WANG Gui-ping, LI Jun-yi, et al. Study on the effect of soil moisture on runoff and infiltration into cropland on slopes[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1987, 9:27-29, 66.
- [15] 张光辉, 梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3):78-83.  
ZHANG Guang-hui, LIANG Yi-min. Study on runoff beginning time of artificial grassland in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(3):78-83.
- [16] 刘金涛, 张佳宝. 前期土壤含水量对水文模拟不确定性影响分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4):519-525.  
LIU Jin-tao, ZHANG Jia-bao. Effect of antecedent soil water content on the uncertainty of hydrological simulation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4):519-525.
- [17] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2):97-101.  
WU Fa-qi, FAN Wen-bo. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2):97-101.
- [18] 徐明岗, 姚其华, 吕家珑. 土壤养分运移[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:32-36.  
XU Ming-gang, YAO Qi-hua, LÜ Jia-long. The soil nutrient migration[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:32-36.
- [19] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: Implications for runoff erosion control[J]. *Catena*, 1998, 32(1):55-70.
- [20] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1):44-47.  
CHEN Hong-song, SHAO Ming-an, WANG Ke-ling. Effects of initial water content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(1):44-47.
- [21] Granovsky A V, McCoy E L, Dick W A, et al. Impacts of antecedent moisture and soil surface mulch coverage on water and chemical transport through a no-till soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 1994, 32:223-236.
- [22] 陈 玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):49-55.  
CHEN Ling, SONG Lin-xu, CUI Yu-jie, et al. Characteristics of phosphorus loss in sloping arable land of yellow-brown soil under artificial rainfall test[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):49-55.
- [23] 杨武德, 王兆骞, 眭国平, 等. 土壤侵蚀对土壤肥力及土地生物生产力的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2):175-178.  
YANG Wu-de, WANG Zhao-qian, GUI Guo-ping, et al. Impact of soil erosion on soil fertility and land productivity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2):175-178.
- [24] 赵 野, 苏芳莉, 崔 彬, 等. 土壤前期含水量对棕壤土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1):25-29.  
ZHAO Ye, SU Fang-li, CUI Bin, et al. Effect of antecedent soil moisture on nutrient loss from Brown Loam Slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1):25-29.
- [25] 熊淑萍, 姬兴杰, 李春明, 等. 不同肥料处理对土壤铵态氮时空变化影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):978-983.  
XIONG Shu-ping, JI Xing-jie, LI Chun-ming, et al. Effect of different fertilizer treatments on spatial-temporal variations of soil ammonium nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):978-983.
- [26] 郭 伦, 李佩武. 降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1):111-115.  
WU Lun, LI Pei-wu. Studies on rainfall process, flow-making and nitrogen and phosphorus losses[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996, 16(1):111-115.
- [27] Philip J R. The theory of infiltration; 5. The influence of the initial moisture content[J]. *Soil Science*, 1957, 84:329-339.
- [28] 王 辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):65-68.  
WANG Hui, WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(5):65-68.